

Origami Falwerke aus Holzwerkstoffplatten

Schlussbericht Holz 21



Hani Buri
Marcel Haasis
Prof. Dr. Yves Weinand

November 2007

Inhalt:

Inhalt:	1
Ausgangslage, Ziele und Inhalte des Projektes.....	2
1.6 Ausgangslage	2
1.7 Ziele	2
1.8 Inhalte	2
2 Projektergebnisse	3
2.6 Wichtige Ergebnisse des Projektes	3
2.6.1 Geeignete Geometrien für Falterwerke	3
2.6.2 Statische Berechnung	4
2.6.3 Verbindungen	4
2.6.4 Machbarkeit der Falterwerke	5
2.7 Beurteilung der Projektergebnisse	6
2.7.1 Stärken	6
2.7.2 Schwächen	6
3 Wirkungen des Projekts in Bezug auf die Mehrnutzung von Schweizer Holz.....	6
3.6 Mehrnutzung von Schweizer Holz.....	6
3.7 Langfristige Wirkung	6
4 Kommunikation der Projektergebnisse.....	7
4.6 Zielgruppe	7
4.7 Kommunikation	7
5 Finanzen.....	8
6 Materialien	9
6.1 Kurzfassung	9
6.2 Publikationen und Artikel	12
6.3 Bericht Phase 3	13

Ausgangsalge, Ziele und Inhalte des Projektes

1.6 Ausgangslage

In den letzten 15 Jahren entwickelte die Holzindustrie einen neuen Werkstoff: grossformatige Brettsperrholzplatten. Als Wandscheiben und Deckenplatten eingesetzt konkurrieren Brettsperrholzplatten mit der traditionellen Massivbauweise. Der neue Werkstoff hat jedoch ein eigenes Gestaltungspotential und eröffnet neue Ansätze sowohl was die Konstruktion als auch die Tragwerksplanung betrifft. Gleichzeitig hat sich der automatisierte Abbund stark entwickelt. Computergesteuerte Anlagen stellen Werkstücke mit komplexen Geometrien her und ermöglichen die Produktion von unterschiedlich geformten Teilen in grosser Anzahl. Die Logik der seriellen Herstellung von identischen Teilen kann überwunden werden. Das Projekt soll Möglichkeiten aufzeigen wie der neue Werkstoff und die computergesteuerte Maschine für innovative Holztragwerke genutzt werden können.

1.7 Ziele

Ziel der Arbeit ist die Herstellung von Faltwerken aus Holzwerkstoffplatten. Eine beliebige Anordnung der Platten im Raum soll durch geeignete Verbindungen ermöglicht werden.

Origami, die Kunst des Papierfaltens, ist die Inspirationsquelle dieser Strukturen. Die Faltung verleiht dem Papier Steifigkeit und ermöglicht die Entwicklung neuer räumlicher Gebilde. Diese im Grunde sehr einfache Technik führt zu einer erstaunlich formellen Vielfalt und Komplexität und die gestalterischen Möglichkeiten scheinen unbegrenzt. Auch die Natur bedient sich des Prinzips des Faltens um leichte Strukturen zu bilden: die Entfaltung von Pflanzenblättern und Insektenflügeln erzeugt große, stabile Flächen mit minimalem Materialaufwand. Einfachheit, Materialhomogenität, Biegsamkeit und Formenvielfalt sowie ökonomischer Materialaufwand sind die Charaktermerkmale von Origami. Mittels einfacher Prinzipien können komplexe Geometrien erzeugt werden.

Diese Arbeit hat zum Ziel, die genannten Eigenschaften auf die Konstruktion mit Holzwerkstoffen zu übertragen. Großformatige Holzplatten und computergesteuerte Abbundanlage ermöglichen den Bau von Faltwerken mit anspruchsvollen Formen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit von Architekten, Informatikern und Ingenieuren, entwickelt die Studie neue Strukturen, Modelle zu deren geometrischen Beschreibung, konstruktive Verbindungen und Berechnungsmodelle.

1.8 Inhalte

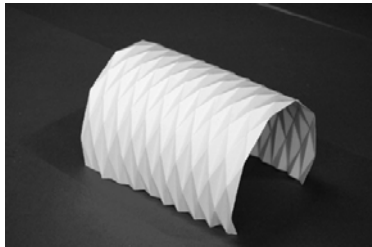
Faltstrukturen werden experimentell aus Papier hergestellt. Die Geometrie der interessantesten Faltpfaden wird analysiert und in einem Zeichenprogramm dargestellt. Anhand von Modellen und Prototypen werden die Geometrie überprüft und Montageprozesse entwickelt. Die Resultate der Belastungsversuche eines Prototyps dienen als Grundlage für die statische Berechnung des Faltwerks und der Entwicklung geeigneter Verbindungen.

2 Projektergebnisse

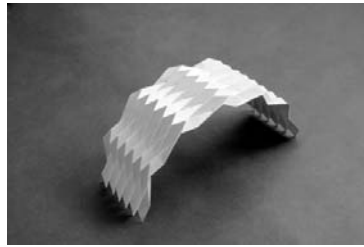
2.6 Wichtige Ergebnisse des Projektes

2.6.1 Geeignete Geometrien für Faltwerke

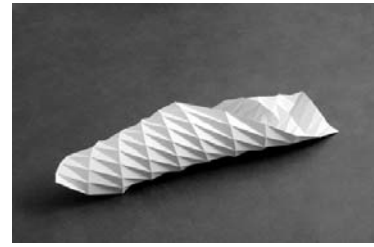
Dank der experimentellen Entwicklung mittels Papierfaltungen konnten drei Faltmuster identifiziert werden welche für Faltwerke interessant sind: die Rautenfaltung, die Fischgrätenfaltung und die Diagonalfaltung. Alle drei basieren auf der Akkordeonfaltung, einer Reihe linearer Berg- und Talfalten welche durch längliche, rechtwinklige Flächen geformt werden. Brettsper Holzplatten, aber auch andere Baumaterialien wie Zinkbleche oder Isolationsmaterialien haben ein ähnliches Format. Die identifizierten Faltgeometrien sind deshalb interessant, weil ihre Elemente ohne grossen Verschnitt aus länglichen Platten hergestellt werden können. Diese drei Grundmuster lassen sich sehr vielfältig variieren.



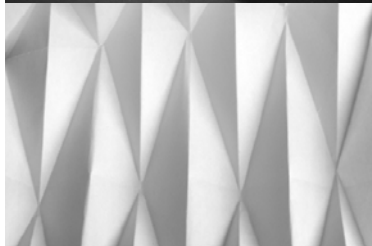
Rautenfaltung



Fischgrätenfaltung



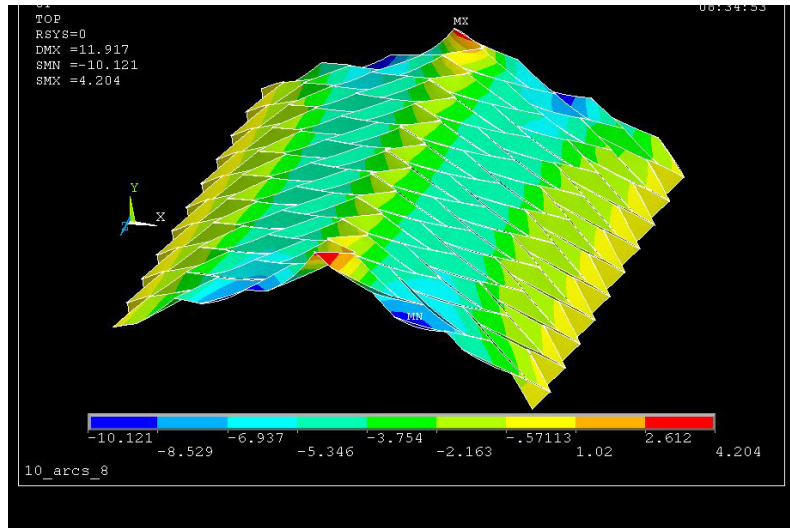
Diagonalfaltung



Zuschnitt von Elementen aus einer länglichen Holzwerkstoffplatte

2.6.2 Statische Berechnung

Die erfolgten Berechnungen haben gezeigt dass faltwerke von der Grösse einer Tennishalle (Spannweite 40m) machbar sind. Die kritischen Bereiche sind die freien Ränder des faltwerks. Dies sind die Bereiche welche für den Aufbau und die Steifigkeit der Verbindungen massgebend sind. Die Berechnung ist zurzeit noch relativ aufwendig und es gilt Methoden zu entwickeln welche die Erfassung der Daten vereinfachen und die Benutzerfreundlichkeit verbessern.

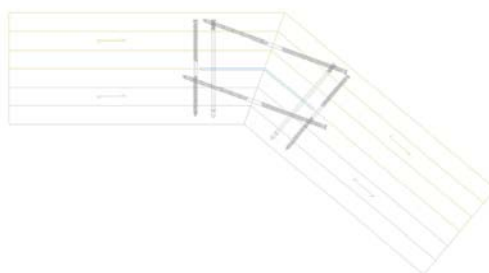


Verformungsdiagramm der Tennishalle (vertikale Verformung)

2.6.3 Verbindungen

Eine Testreihe mit variablen Aufbauten hat gezeigt dass relativ einfache Verbindungen mit modernen, stiftförmigen Verbindungsmitteln für faltwerke angezeigt sind. Die Steifigkeit der Verbindungen kann durch die Anzahl Stifte und deren Anordnung angepasst werden. Ein doppelschichtiger Aufbau kann in den besonders belasteten Randbereichen angewendet werden. Dieser Aufbau ist aber auch aus montage-technischen Überlegungen interessant. Im weniger belasteten Mittelbereich kann die zweite Platte teilweise durch eine Dämmschicht ersetzt werden.

Weitere Versuche sollen zeigen inwiefern die vorgeschlagenen Verbindungen auch für stumpfere oder spitzere Winkel geeignet sind. Auch soll der Aufbau der Verbindungen vereinfacht werden.



Aufbau der Verbindungen

2.6.4 Machbarkeit der Faltwerke

Der gebaute Prototyp und die Berechnungen am Beispiel einer Tennishalle haben gezeigt dass Faltwerke welche auf den vorgeschlagenen Geometrien beruhen, machbar sind. Die Verformungen des Faltwerks bei Belastungsversuchen liegen in einem annehmbaren Rahmen. Die berechnete Tennishalle könnte mit zwei 10cm starken Schichten gebaut werden. Der Aufbau des Prototyps hat dank Montageschablonen und der relativen Verformbarkeit der Einzelteile gut funktioniert. Wir sind davon überzeugt dass als nächster Schritt ein Faltwerk im Massstab 1:1 gebaut werden sollte und suchen aktiv einen Partner der eine solche Struktur realisieren möchte.



Der Prototyp im Prüfstand

2.7 Beurteilung der Projektergebnisse

2.7.1 Stärken

- Es ist möglich mit Papierfaltungen Geometrien zu erzeugen die für den Bau von faltwerken mit Brettsperrholzplatten geeignet sind.
- Die Geometrien basieren auf einfachen Grundfaltungen und können sehr stark variiert werden. Es entstehen sehr vielseitige und faszinierende Formen. Dadurch entsteht die Möglichkeit von individueller Vorfertigung: Mit demselben Konstruktionsprinzip können Bauten entstehen welche spezifischen Anforderungen und individuellen Kundenwünschen gerecht werden.
- Anhand vom Bau eines Prototyps und anhand der Berechnungen konnte gezeigt werden dass Origami faltwerke machbar sind.

2.7.2 Schwächen

- Die computerunterstützte Generierung der faltwerkgeometrien sollte vereinfacht und automatisiert werden.
- Obwohl interessante Lösungen für Verbindungen aufgezeigt werden konnten muss dieser Punkt weiter entwickelt werden um den Anforderungen von verschiedenen Situationen gerecht zu werden.
- Die Berechnung von komplexen faltwerken ist zurzeit noch sehr aufwendig und muss vereinfacht werden.

3 Wirkungen des Projekts in Bezug auf die Mehrnutzung von Schweizer Holz

3.6 Mehrnutzung von Schweizer Holz

Die faltwerke werden aus Brettsperrholz hergestellt. Brettsperrholz ist ein relativ neues Material und in der Schweiz gibt es zwei Firmen die zu den Pionieren der Brettsperrholz-herstellung gehören. Beide stellen ihre Platten aus einheimischem Holz her. Falls in der Schweiz faltwerke mit Brettsperrholz gebaut werden ist die Wahrscheinlichkeit gross das die Platten von diesen Produzenten geliefert werden. Wir sind in Kontakt mit der Firma Schilliger um gemeinsam einen Bauherren zu finden welcher interessiert ist ein faltwerk zu realisieren.

Faltwerke aus Brettsperrholzplatten haben ein hohes Identifikationspotential, sie faszinieren sowohl Fachleute als auch Laien. Deshalb sind sie geeignet aufzuzeigen das Holz ein moderner Werkstoff ist mit welchem innovative Bauten hergestellt werden können. Die Faszination für faltwerke kann das Interesse an Holzbauten im Allgemeinen fördern und ein neue Produkt, die Brettsperrholzplatten einem Fachpublikum bekannt machen.

3.7 Langfristige Wirkung

Das Projekt „Origami faltwerke aus Holzwekstoffplatten“ wird in einer nächsten Phase weiterentwickelt. Dabei sollen in erster Linie die unter 2.7.2 angesprochenen Punkte ausgearbeitet werden.

Es wird angestrebt ein faltwerk im Massstab 1:1 zu bauen. Diesbezügliche Kontakte mit verschiedenen potentiellen Partnern sind im Gang.

4 Kommunikation der Projektergebnisse

4.6 Zielgruppe

Die wichtigsten Zielgruppen für dieses Projekt sind Ingenieure und Architekten. Sie können in ihrer Arbeit einem potentiellen Kunden eine Faltwerkstruktur vorschlagen. Eine weitere Zielgruppe sind private und institutionelle Bauherren.

4.7 Kommunikation

Kongresse und Publikationen :

- Buri H., Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten, Holzforschung Schweiz, Statusseminar SAH, Juni 2006
- Buri H., Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten, Grazer Holzbau-Fachtagung, September 2006
- Weinand Y., Buri H., Stotz I., Zukunftsperspektiven aus der Forschung, SAH Fortbildungskurs, November 2007
- Weinand Y., Haasis M., Origamifaltwerke, neue Anwendungen für Brettsperrholzplatten, SAH Fortbildungskurs, November 2007
- Weinand Y., Laboratoire des constructions en bois IBOIS: projets de recherche, EPFL IBOIS, März 2007

Vorträge

- Weinand Y., Holz – ein High-Tech-Baustoff mit Zukunft, Europäischer Tag des Denkmals, Architekturforum Bern, September 2007
- Weinand Y., Inventioneering architecture , Shanghai, April 2007
- Buri H., Origami; structures plissées en produits dérivées du bois, Cours de construction en bois pour architectes et ingénieurs II, Sommersemester 2006 und 2007
- Buri H., Origami; structures plissées en produits dérivées du bois, EIG, Genf Januar 2007

Austellungen

- Inventioneering architecture, Berlin, mai juin 2006, Dubai et Shanghai en 2006, Singapore et Zürichen 2007 (Exposition collective)
- Buri H., Origami; structures plissées en produits dérivées du bois, Journée des doctorants ENAC, Poster, 2006 und 2007

Artikel in Fachzeitschriften und Zeitungen :

- Weinand Y., Origami, Brettrippen und Reibschweissen, Der Bauingenieur n°5, 2006 pp 60-63
- Weinand Y., Nouveaux moyens informatiques. Changement de paradigme?, Matières n°8, 2006, pp 12-19
- Lempelius J., Gipfeltreffen der Schweizer Holzforscher, Holzzentralblatt, n°826, 2006, p 826
- Hohler A., Visite guidé du Laboratoire de construction en bois, Tracés n°17, 2006
- Hohler A., Visite guidé du Laboratoire de construction en bois, NIKE, 1-2, September 2007-11-16

- Lempelius J., Atractivas obras plegadas, Holzzentralblatt, Spezialausgabe, November 2007 p14
- Parplan G., Le bois en forme, Terre et nature, octobre 2007
- Ender R., Architectures de l'origami, Kaële, 2007

Individuelle Gespräche mit Architekten, Ingenieuren, Produzenten und potentiellen Bauherren

Internet :

<http://ibois.epfl.ch/page12023.html>

5 Finanzen

Kosten

Brettsperrholz
Material
Werkzeuge und Maschinen
Informatik und Software
Feste Laborkosten
Lohn Architekt 50%
Lohn Ingenieur 50%
Lohn Labortechniker 25%

Total

	Phase 1	Phase 2	Phase 3		Total
Fr	-	Fr 20'000	40'000	Fr	60'000
Fr	-	Fr 8'000	Fr 12'000	Fr	20'000
Fr	-	Fr 5'000	Fr 10'000	Fr	15'000
Fr	7'000	Fr 7'000	6'000	Fr	20'000
Fr	-	Fr 8'000	Fr 12'000	Fr	20'000
Fr	12'000	Fr 18'000	Fr 39'000	Fr	69'000
Fr	12'000	Fr 18'000	Fr 39'000	Fr	69'000
Fr	6'000	Fr 9'000	Fr 19'500	Fr	34'500
Fr	37'000	Fr 93'000	Fr 177'500	Fr	307'500

Finanzierung

IBOIS
Bois 21
Industriepartner

Total

	Phase 1	Phase 2	Phase 3		Total
Fr	30'000	Fr 53'000	Fr 109'500	Fr	192'500
Fr	7'000	Fr 40'000	Fr 22'000	Fr	69'000
Fr	-	Fr -	Fr 46'000	Fr	46'000
Fr	37'000	Fr 93'000	Fr 177'500	Fr	307'500

6 Materialien

6.1 Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Herstellung von Faltwerken aus Holzwerkstoffplatten. Eine beliebige Anordnung der Platten im Raum soll durch geeignete Verbindungen ermöglicht werden.

Origami, die Kunst des Papierfaltens, ist die Inspirationsquelle dieser Strukturen. Die Faltung verleiht dem Papier Steifigkeit und ermöglicht die Entwicklung neuer räumlicher Gebilde. Diese im Grunde sehr einfache Technik führt zu einer erstaunlich formellen Vielfalt und Komplexität: Die gestalterischen Möglichkeiten scheinen unbegrenzt. Sowohl Künstler als auch Wissenschaftler interessieren sich für *Origami* und integrieren die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Prinzipien in ihre Arbeit.

Mathematiker haben neue Algorithmen entwickelt und benutzen *Origami* im Geometrieunterricht. Auch die Natur bedient sich des Prinzips des Faltens um leichte Strukturen zu bilden: die Entfaltung von Pflanzenblättern und Insektenflügeln erzeugt große, stabile Flächen mit minimalem Materialaufwand.

Durch Variieren und Kombinieren einfacher Faltprinzipien können komplexe Geometrien erzeugt werden. Einfachheit, Homogenität, Biegsamkeit, Formenvielfalt und ökonomischer Materialaufwand sind die Charaktermerkmale von *Origami*. Diese Arbeit hat zum Ziel, die genannten Eigenschaften auf die Konstruktion mit Holzwerkstoffen zu übertragen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit von Architekten, Informatikern und Ingenieuren entwickelt die Studie neue Faltstrukturen, Modelle zu deren geometrischen Beschreibung, konstruktive Verbindungen und Berechnungsmodelle.

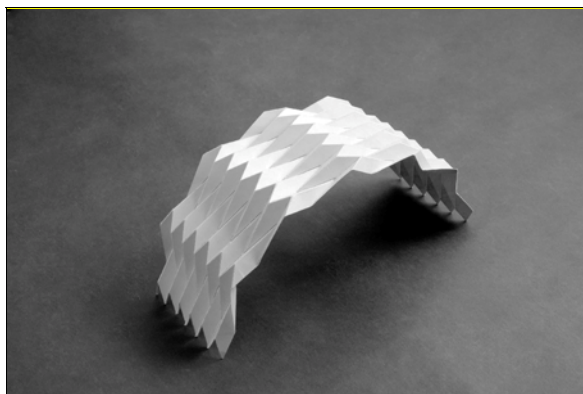


Abb. 1: Muira Ori Pattern

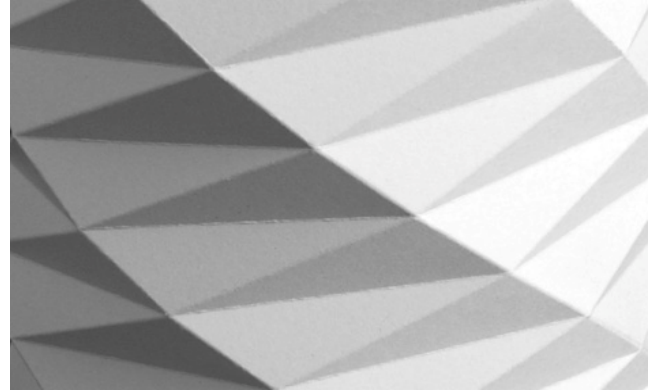
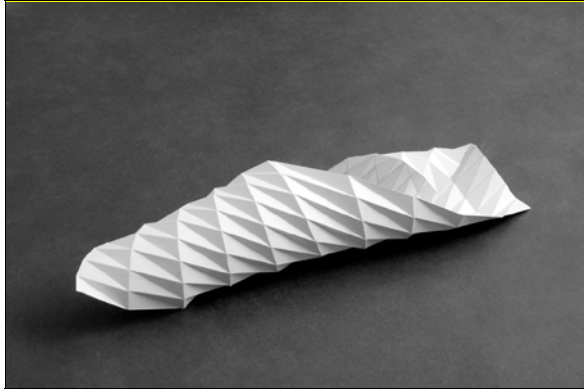


Abb. 3: *Diagonal Muster*

Anhand einer Reihe gefalteter Papiermodelle wird das formale und räumliche Potential dieser Technik ausgelotet. Es konnten drei Faltmuster, welche für Architekten und Tragwerksplaner besonders interessant sind, identifiziert werden: „Yoshimura Pattern“ (Rautenmuster, Abb. 1) „Mura Ori Pattern“ (Fischgrätenmuster, Abb. 2) und Diagonal Muster (Abb. 3). Alle drei beruhen auf einer einfachen Akkordeon-Faltung: Die parallelen, gestreckten Berg- und Talfalten werden geknickt und umgepolt. Bergfalten werden zu Talfalten und umgekehrt. Dadurch wird die gerippte, zweidimensionale Fläche zum räumlichen Faltwerk. Geometrische Analysen zeigen, dass solche Formen durch zwei polygonale Linien erzeugt werden können (Abb. 4). Dadurch können komplexe Faltwerke sowohl im Raum wie auch als entfaltete Fläche rasch und einfach dargestellt werden. Der Typus der Faltwerke wird durch die Form der die Fläche generierenden, polygonalen Linien und deren inhärenten Grenzwerte bestimmt.

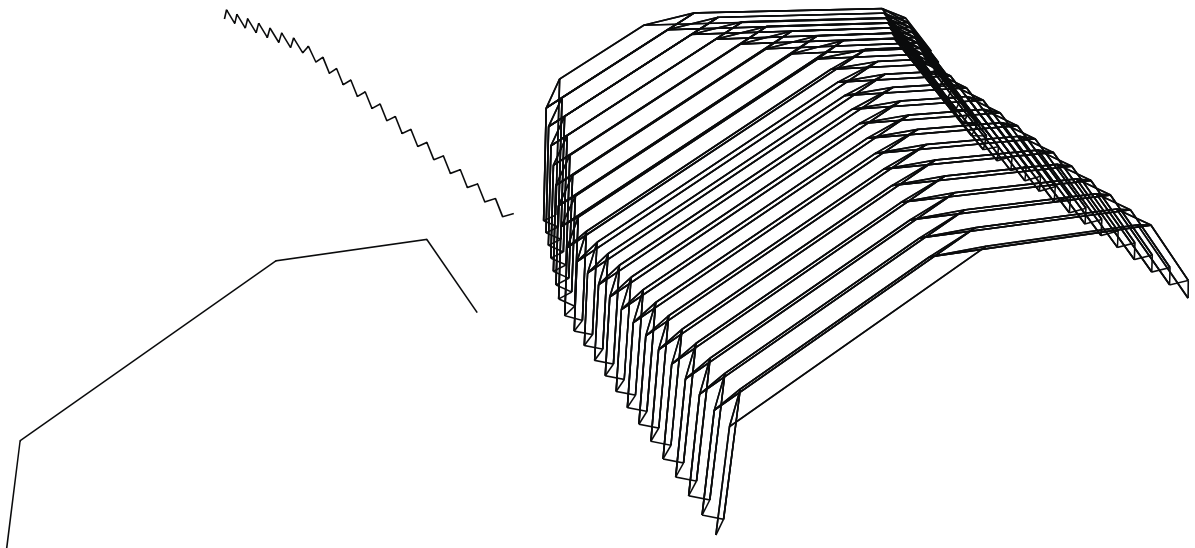


Abb. 4: *Erzeugung eines Faltwerks durch zwei polygonale Linien*

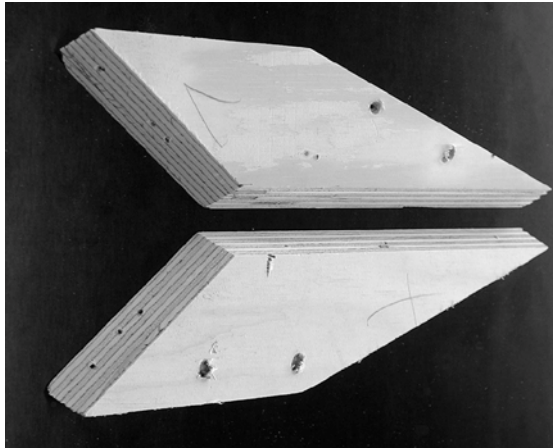


Abb. 5: Grundbausteine des Prototypen

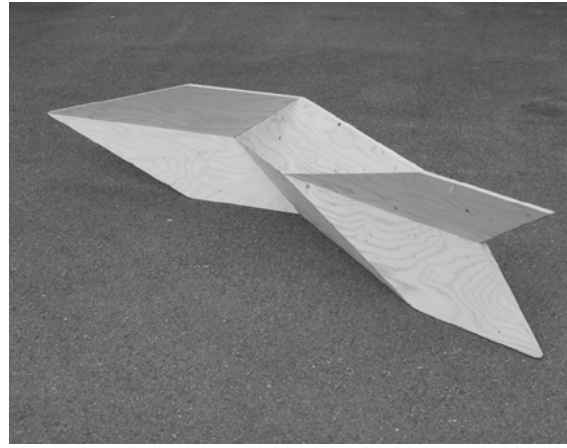


Abb.6: sechs zusammengesetzte Grundbausteine

Durch den Bau von Prototypen werden die Verbindungen der Platten und deren Aufbau zum Faltwerk geprüft (Abb. 5-9). Verformbarkeit und Bruchfestigkeit werden anhand von Belastungsversuchen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Versuche bilden die Grundlage für die ingenieurtechnische Entwicklung der Arbeit.

Die Arbeiten zeigen, dass Faltwerke welche auf *Origami* beruhen, machbar und für Architekten sowie für Tragwerksplaner gleichermassen attraktiv sind. Mittels der vorgeschlagenen Methoden können komplexe Geometrien rasch und einfach generiert werden.

Dieses Projekt wird durch Holz 21, ein Förderprogramm des Bundesamts für Umwelt BAFU unterstützt



Abb. 7: Aufbau zum Faltwerk

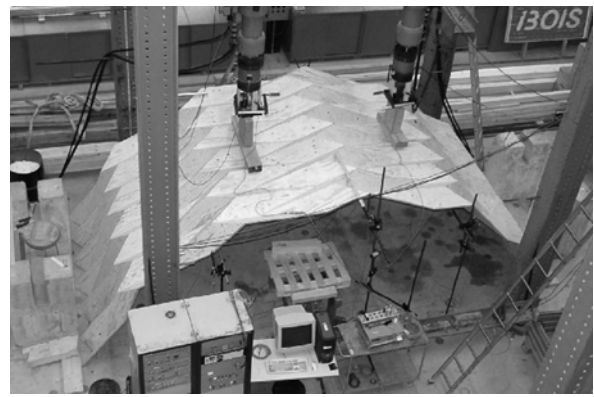


Abb. 8: Belastungsversuch

6.2 *Publikationen und Artikel*

- Buri H., Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten, Holzforschung Schweiz, Statusseminar SAH, Juni 2006-
- Buri H., Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten, Grazer Holzbau-Fachtagung, September 2006
- Weinand Y., Buri H., Stotz I., Zukunftsperspektiven aus der Forschung, SAH Fortbildungskurs, November 2007
- Weinand Y., Haasis M., Origami Faltwerke, neue Anwendungen für Brettsperrholzplatten, SAH Fortbildungskurs, November 2007
- Weinand Y., Laboratoire des constructions en bois IBOIS: projets de recherche, EPFL IBOIS, März 2007
- Poster Origami
- Weinand Y., Origami, Brettrippen und Reibschweissen, Der Bauingenieurⁿ5, 2006 pp 60-63
- Hohler A, Visite guidé du Laboratoire de construction en bois, Tracés n°17, 2006
- Hohler A, Visite guidé du Laboratoire de construction en bois, NIKE, 1-2, September 2007-11-16
- LempeliusJ, Atractivas obras plegadas, Holzzentralblatt, Spezialausgabe, November 2007 p14
- Parplan G, Le bois en forme, Terre et nature, octobre 2007
- Ender R, Architectures de l'origami, Kaële, 2007

6.3 Bericht Phase 3

Origamifaltwerke aus Holzwerkstoffplatten

Bericht Phase 3

1 Charakteristik von Faltwerken

Die Tatsache ebene Strukturen aufzufalten, um deren Tragfähigkeit erheblich zu erhöhen, ist aus vielen Bereichen bekannt. So zum Beispiel ist die Wellpappe ein weitverbreitetes und alltägliches Produkt. Im Bauwesen sind Sheddachstrukturen eine geläufige Anwendung dieses Prinzips. Der Grundgedanke ist, ebene Flächen mehr durch Normalkräfte in ihrer Ebene als durch Momente aus ihrer Ebene heraus zu beanspruchen. Diese Art von Lastabtragung ist weit wirtschaftlicher und effektiver als die aufwändige Abtragung durch Biegung.

In einem zweiten Schritt gilt das Hauptaugenmerk der Fügung der einzelnen Bauteile. Die Frage, die sich stellt, ist deren Ausführung als gelenkig oder steif. In der praktischen Anwendung stellt sich die Frage allerdings anders, da sich weder perfekt gelenkig noch perfekt steif in der Mehrzahl aller Fälle realisieren lässt.

2 Konzept der Arbeit

Ziel der dargestellten Arbeit ist es, die komplexen Faltwerke der Origamistrukturen statisch zu erfassen und Vorschläge für die Realisierung bereitzustellen. Dies beinhaltet insbesondere die Art der Verbindung der einzelnen Bauteile, die Ausführung der Holzverbindungen und die Dimensionierung der Massivholzplatten. In einem weiteren Schritt wird untersucht, inwieweit die vom Architekten vorgeschlagenen Strukturen optimiert werden können, um wirtschaftlichere Lösungen anbieten zu können. In diesem Zusammenhang werden auch die Massivholzplatten kritisch betrachtet. Jedes Material hat Anwendungsgebiete, in denen es wirtschaftlicher als in anderen eingesetzt werden kann. Aus diesem Grund werden die Eigenschaften und Leistungen der verschiedenen Produkte analysiert und mit den Anforderungen der Faltwerke verglichen. Hieraus ergeben sich Vorschläge, inwieweit die Produkte modifiziert werden können, um sie besser an die Eigenheiten der Strukturen anzupassen. Des weiteren gilt es, eine Verbindung zu konzipieren, die einerseits elastisch genug ist, um die Schnittgrößen aufzunehmen und zum anderen steif genug ist, um die Verformungen nicht zu gross werden zu lassen.

3 Statische Berechnung

3.6 Einführung

Die statische Berechnung von Faltwerken bedarf eines grossen computergestützten Aufwands, um die Verformungen und Schnittgrößen möglichst treffend vorausbestimmen zu können. Im Vergleich zu anderen Anwendungen von Massivholzplatten ist die Anzahl der Bauteile wesentlich höher und deren Interaktion erheblich komplexer, insbesondere an den Schnittstellen der einzelnen Flächen. Der stark in-

homogene Aufbau der Platten kombiniert mit dem orthotropen Materialgesetz erhöht die Komplexität jeglicher Art von statischer Berechnung. Dies gilt bereits ohne die bekannten weiteren Randbedingungen wie die dem Holz zueigenen relativ hohen Streuungen der Materialkennwerte und der Eigenschaften der Holzverbindungen. Ein Vergleich zwischen Rechnung und Realität muss stets vor diesem Hintergrund betrachtet werden.

Aufgrund der geometrischen Vielfalt der oben erwähnten Eigenheiten des Materials, sowie der mechanischen Komplexität der Verbindungen und zuletzt deren Zusammenwirken, ist der Ansatz zur statischen Berechnung die Methode der finiten Elemente, die eine numerische Lösung der Aufgabe liefern. Aktuelle Software ist in der Lage, das orthotrope Materialgesetz und den geschichteten Aufbau zu simulieren.

3.7 *Bisheriger Stand*

Zu Beginn der Arbeit wurde die Machbarkeit eines Origamibauwerks durch die Erstellung eines Modells mit den Abmessungen (6.20m/2.88m/2.30m) gezeigt. Dieser Prototyp diente gleichzeitig dazu, die parallel durchgeführte Modellierung durch mehrere Softwarepakete einzustufen. Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen verschiedene Ansichten des fertiggestellten Prototyps.

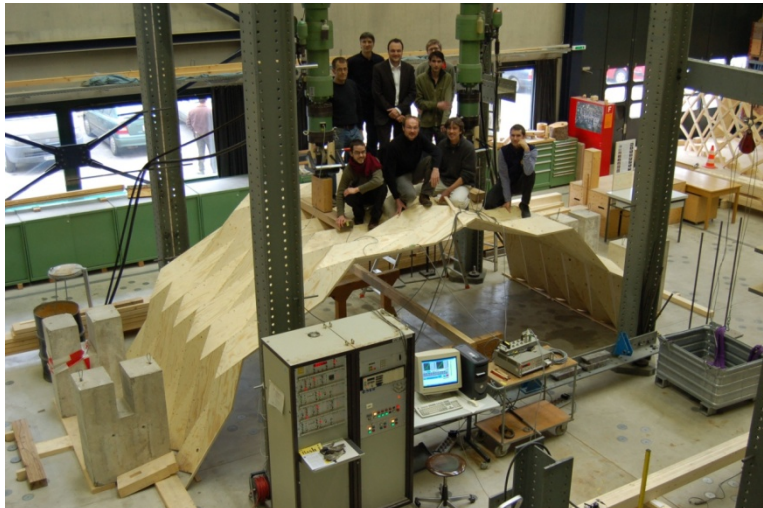


Abb. 3.1: *Prototyp*



Abb. 3.2: *Innenansicht der Faltstruktur*

In einem weiteren Schritt wird die Struktur einer möglichen Tennishalle (45.20m / 41.50m / 11.80m) ausschliesslich am Rechner modelliert. Dieses Modell dient dazu, geometrische und materialspezifische Parameter zu variieren und deren mechanische Auswirkungen zu untersuchen. Desweiteren wurden die aus den in vier beschriebenen Versuchen gewonnenen Steifigkeitswerte in die Analyse integriert. In Abb. 3.3 dargestellt ist die Bildschirmausgabe der Ausgangskonstruktion der Halle.

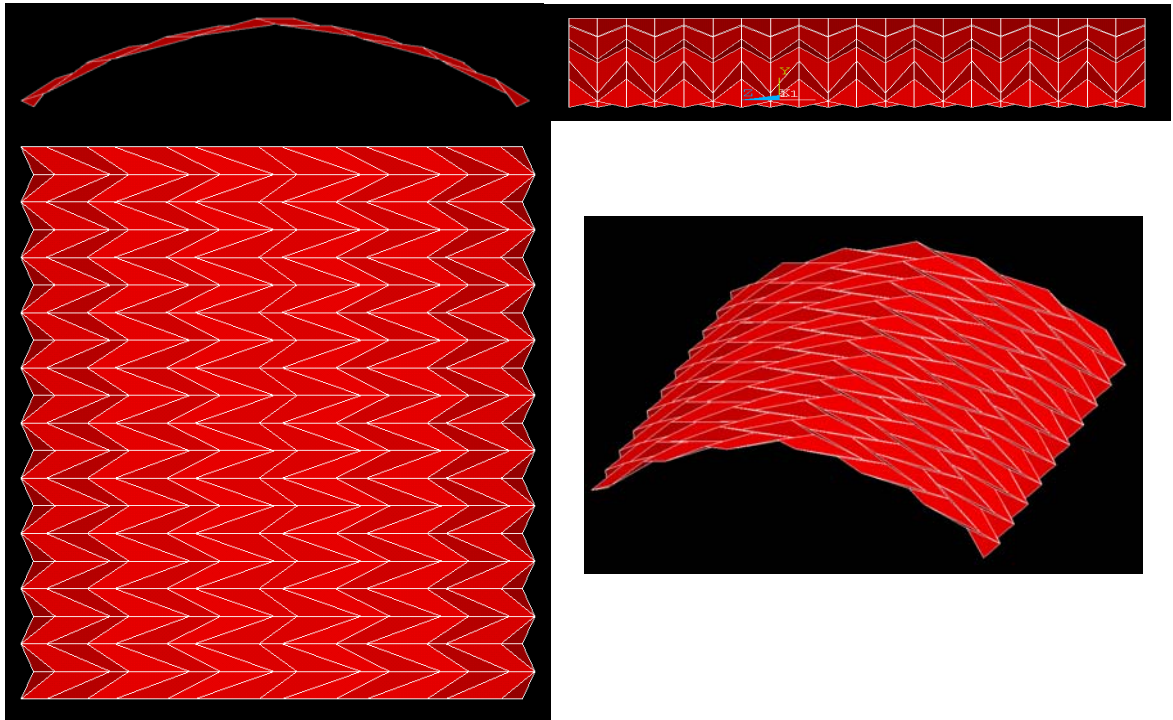


Abb. 3.3: Numerisches Modell einer Tennishalle

Die verwendeten Softwareprogramme wurden gestaffelt nach Leistungsfähigkeit ausgesucht. Hierdurch soll festgestellt werden, wie gross der Rechen- und Kostenaufwand sein muss, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. In der Auswahl der Programme ist zunächst eine Lösung, die im alltäglichen Gebrauch in einer Vielzahl von Ingenieurbüros zur Anwendung kommt (RFEM), anschliessend ein Softwarepaket, das aus der Wissenschaft stammt und inzwischen als kommerzielle Version zur Anwendung kommt (SAP 2000). Desweiteren gibt es ein leistungsfähiges Finite-Element-Programm, das den geschichteten Aufbau der Platten und komplexe Gelenkdefinitionen beherrscht (Ansys 11). Zuletzt kommt das Finite-Elemente-Paket der Firma Samtech, mit der eine Entwicklungskooperation geplant ist, zum Einsatz. Es gilt eine hohe Übereinstimmung der verschiedenen verwendeten Codes zu erzielen. Zu diesem Zweck wurden mit jedem Programm jeweils die Linienverbindungen gelenkig und steif berechnet. Diese Arbeit kann als gute Aufgabe angesehen werden, die verwendeten Softwarepakete bis ins Detail kennenzulernen und sie voneinander unterscheiden und einstufen zu können. Die am Prototyp gemessenen Verformungen befinden sich allesamt zwischen den in den Modellierungen vorbestimmten Extremfällen gelenkig und steif.

3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Anwendungen

Die Bedeutung der Gelenkausbildung ist je nach Bereich der Struktur unterschiedlich. Geht man von einer Bogenkonstruktion mit Ausdehnung in Längsrichtung aus, wie es der Fall für den Prototyp und die Konstruktion im realen Massstab ist, muss man zwischen den Bereichen „ungestörter Mittelbereich“ und „freier Giebelbereich mit Randeinflüssen“ unterscheiden (siehe Abb. 3.4). Speziell im Randbereich nehmen die Verformung und Schnittgrössen, wie dies aus der Schalentheorie bekannt ist, erheblich zu.

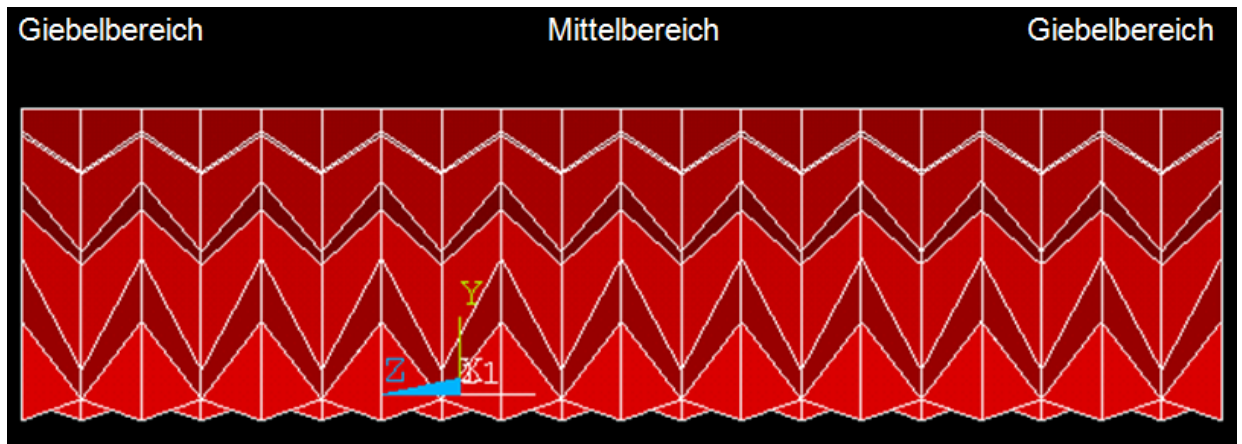


Abb. 3.4: Unterscheidung von Mittel- und Randbereich

Um diesem Phänomen zu begegnen, gibt es mehrere Ansatzpunkte.

- Externe Unterstützung des Giebels
- Geometrische Modifikation der Struktur
- Anpassung der Verbindungssteifigkeit

Die beiden letzteren sind diejenigen, die im Rahmen der Arbeit weiter untersucht werden.

3.8.1 Geometrische Modifikation der Struktur

Das Prinzip, auf das sich Faltwerke im Allgemeinen stützen, ist der Gewinn an Steifigkeit durch die Umlagerung von Biegung auf Normalkräfte, also in Ebene der Platte wirkende Kräfte. Stark vereinfachend kann man sich den Sachverhalt durch die Regel „je steiler, desto steifer“ vorstellen. Mit zunehmender Verdichtung der Faltung wird die Steifigkeit rechtwinklig zur Ausgangslage der Fläche höher. Gleichzeitig allerdings nimmt sie in Richtung der ursprünglichen Fläche ab. Dieser Sachverhalt lässt sich eindrücklich anhand der im Folgenden beschriebenen Modifikation der Geometrie verdeutlichen.

Das gleiche Origamifaltprinzip wie im Mittelbereich wird im Randbereich enger gestaffelt mit der Absicht die vertikale Steifigkeit zu erhöhen und somit die vertikalen Verformungen zu verringern. Abb. 3.5 zeigt die Umsetzung im numerischen Modell. Als Ergebnis lässt sich beobachten, dass die vertikale Verformung abnimmt, die horizontale hingegen zu. Angesichts dieser Tatsache und der möglichen Spannungen mit dem architektonischen Entwurf gilt es, weitere Alternativen zur Optimierung bereitzustellen.

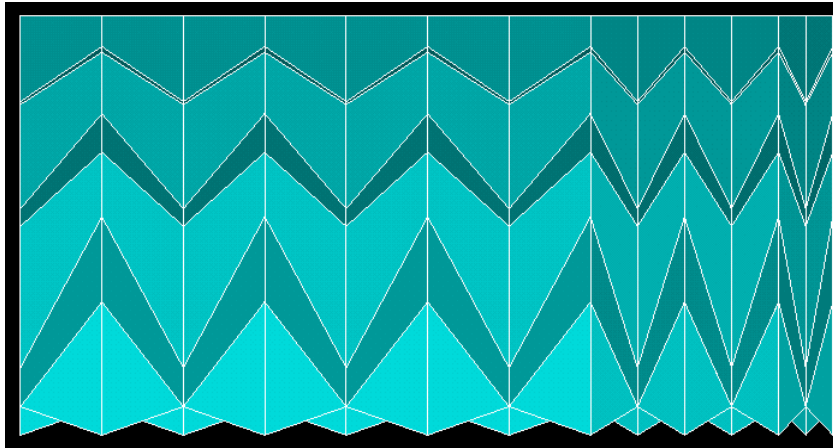


Abb. 3.5: Engere Faltung zum rechten Rand

3.8.2 Steifigkeit der Linienverbindung

Die Simulationen am Modell in Originalgrösse haben gezeigt, dass die Anforderungen im ungestörten Mittelbereich weitaus geringer sind, als im Randbereich. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, die Verbindungen an die im Randbereich anzutreffenden Anforderungen anzupassen. Hier gilt es ein Gleichgewicht zu finden zwischen den durch die erhöhten Steifigkeiten grösseren Schnittgrössen und den dazu erforderlichen höheren Festigkeiten der Verbindung.

4 Verbindungen

4.6 Versuchszusammenstellung

Nach einer Reihe von Vorüberlegungen wurden die im Anschluss dargestellten Verbindungen aufgrund von Ansprüchen und Anforderungen von seiten der Architektur und der Ingenieurie festgelegt. Ziel der Versuche war es, die Biegesteifigkeit und Querkraftfestigkeit der Verbindungen zu erfassen. Als Ausgangsmaterial wurden Schilliger Grossformatplatten der Stärke 110 mm verwendet. Als Verbindungsmittel kamen ausschliesslich selbstbohrende Vollgewindeschrauben und –stabdübel der Firma SFSintec zum Einsatz. Die gefalzten Bleche wurden von einer lokalen Schlosserei gefertigt.

In der Zwischenzeit haben die Erkenntnisse aus den Versuchen und weitere Überlegungen dazu geführt, dass die hier dargestellten Verbindungen modifiziert und weiterentwickelt werden können.

Es wurden vier Typen mit drei zu variierenden Parametern untersucht. Alle Verbindungen sind rein mechanisch und ohne Klebstoff realisiert.

Die vier Verbindungstypen lassen sich folgendermassen untergliedern:

1. Einzelne Lage mit Vollgewindeschraube
2. Zwei Lagen mit Vollgewindeschraube
3. Zwei Lagen mit gefalztem Blech und selbstbohrenden Stabdübeln
4. Zwei Lagen mit Vollgewindeschraube und gefalztem Blech

Beispielhaft ist in Abb. 4.1 eine Verbindung vom Typ 4 eingebaut im Versuchsstand dargestellt.

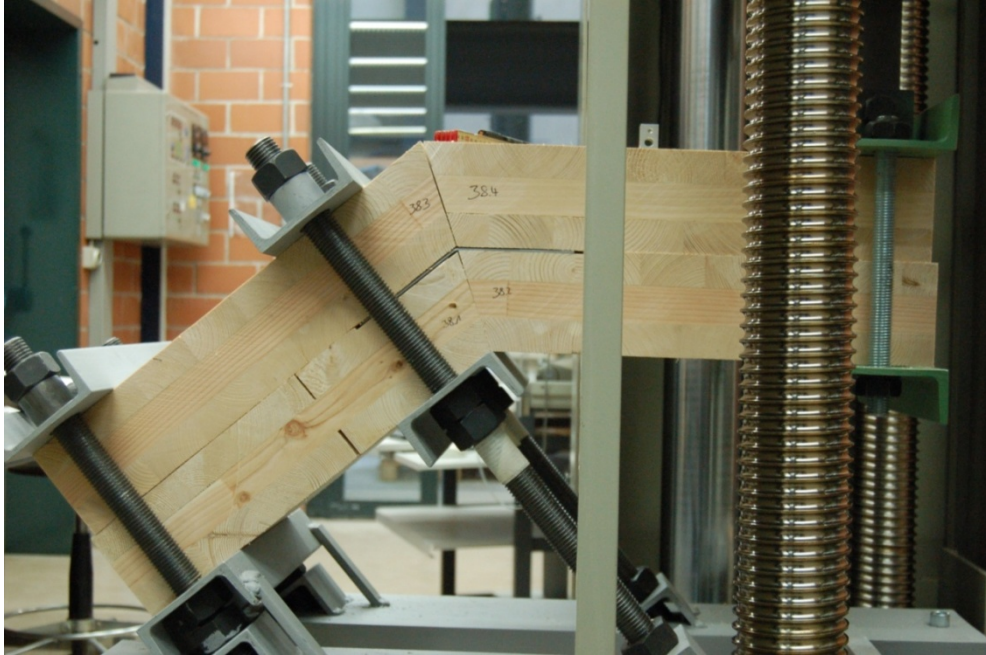


Abb. 4.1: Versuchskörper des Typs 4 im eingebauten Zustand

Bei jeder dieser vier Verbindungstypen galt es, drei unabhängige und das Ergebniss beeinflussende Parameter zu variieren. Diese sind die folgenden:

1. Winkel der Verbindung
2. Abstand der Verbindungsmittel
3. Dicke des Eisenblechs bei den entsprechenden Typen

Die Zusammenstellung der Versuche wurde nach dem Prinzip der statistischen Versuchsplanung ausgeführt. Durch die gleichzeitige Veränderung verschiedener Parameter und die logische Auswertung der Ergebnisse ist somit die maximale Ausbeute an Information aus einer minimalen Anzahl von Versuchen sichergestellt. Die Versuche wurden weggesteuert und in Zyklen mit zunehmender Amplitude gefahren. Auf eine Aufwärtsbewegung bis zu einer bestimmten Auslenkung folgt die gleiche Auslenkung in entgegengesetzter Richtung.

4.7 Erste Versuchsauswertung

Bis zu diesem Zeitpunkt sind die Versuchsergebnisse noch nicht vollständig ausgewertet. Daher wird hier zunächst ein Einblick in die ersten Erkenntnisse gegeben. Anhand der untenstehenden Diagramme werden die wesentlichen Merkmale erläutert. Diagramm 4.1 zeigt für den wie oben beschriebenen Verbindungstyp 4 die Verläufe der Momenten-Verdrehungs-Kurven. Die eingestellten Parameter sind $\alpha = 40^\circ$, $e = 250\text{mm}$ und $t = 3\text{mm}$.

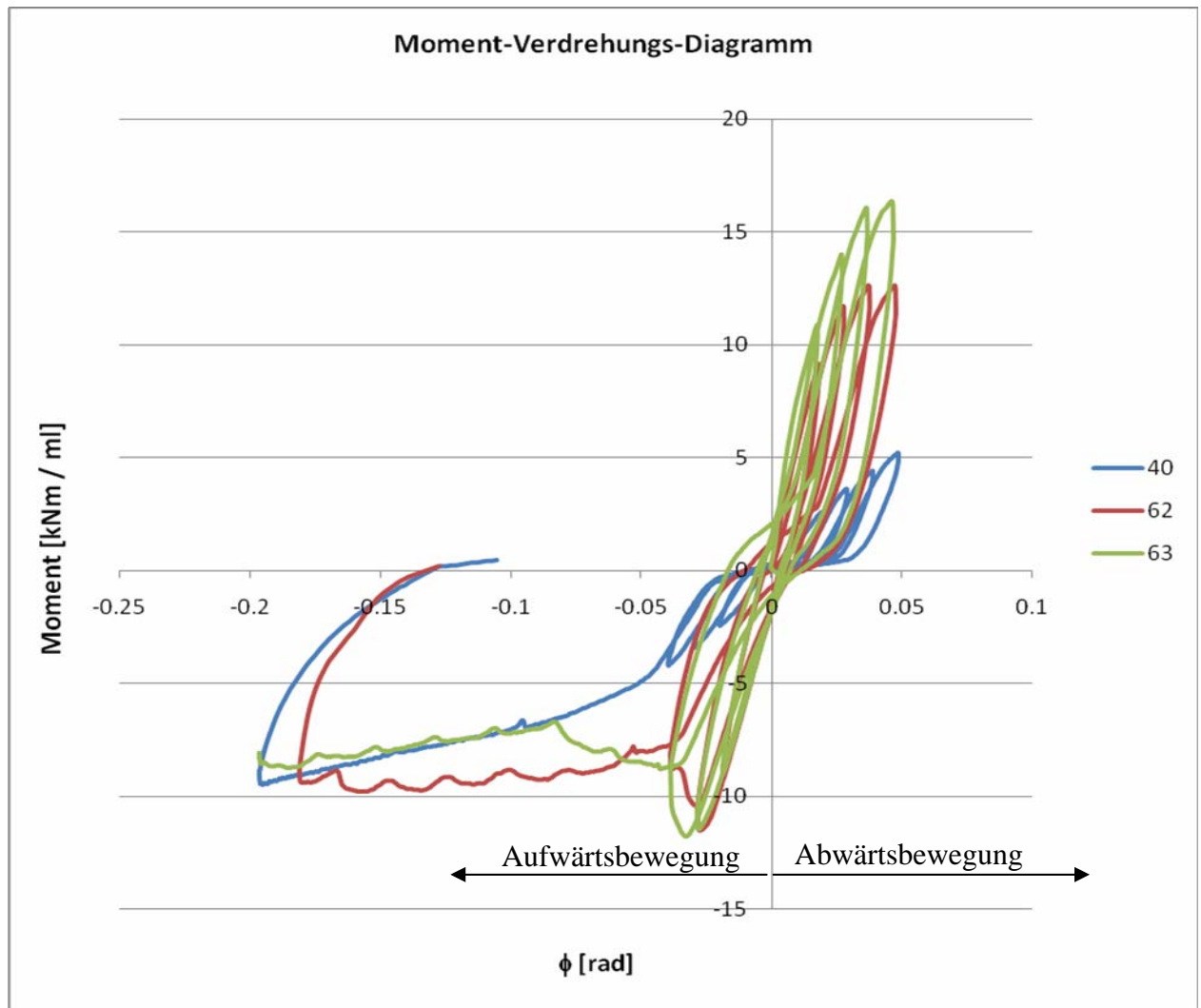


Diagramm 4.1 Momenten-Verdrehungs-Diagramm

Es wird die starke Variabilität der Messungen deutlich – die erreichten Maximalwerte des aufgenommenen Moments weichen erheblich voneinander ab. Dieser Beobachtung liegt die Tatsache zugrunde, dass die eingedrehten Schrauben, wie hier im Versuchskörper 40 der Fall, in einem Spalt der Mittellage eingebracht wurden, was die Herauszieh Widerstandsfähigkeit beachtlich herabsetzt. Dieser Umstand muss berücksichtigt werden, da er in der Realität nicht ausgeschlossen werden kann. Zwei wesentliche Erkenntnisse können aus dieser Tatsache abgeleitet werden. Zum einen ist die zu erwartende Federsteifigkeit (die Steigung der Kurven) geringer als bei voll ins Holz eingedrehten Schrauben und zum anderen ist die Leistungsfähigkeit der Verbindung (die Ordinatenwerte) ebenfalls geringer. Beim Zusammenbau der Versuchskörper wurde darauf geachtet, dass die Verteilung der Schrauben „im Spalt“ und „voll im Holz“ der zu erwartenden Wahrscheinlichkeit entspricht. Diese Wahrscheinlichkeit wurde über das Verhältnis des Spaltabstands zum Schraubendurchmesser ermittelt.

Desweiteren ist festzustellen, dass sich mit zunehmender zyklischer Belastung plastische Verformungen einstellen. Die aufgezeichneten Kurven werden daher als Hystereseschleifen bezeichnet. Für die Anwendung bedeutet dies, dass Belastungen unter Berücksichtigung der Vorgeschichte der Verbindung untersucht werden müssen.

Diagramm 4.2 betrachtet den Versuchskörper unter einem anderen Betrachtungswinkel. Es ist die Federsteifigkeit über dem aufgetragenen Moment dargestellt.

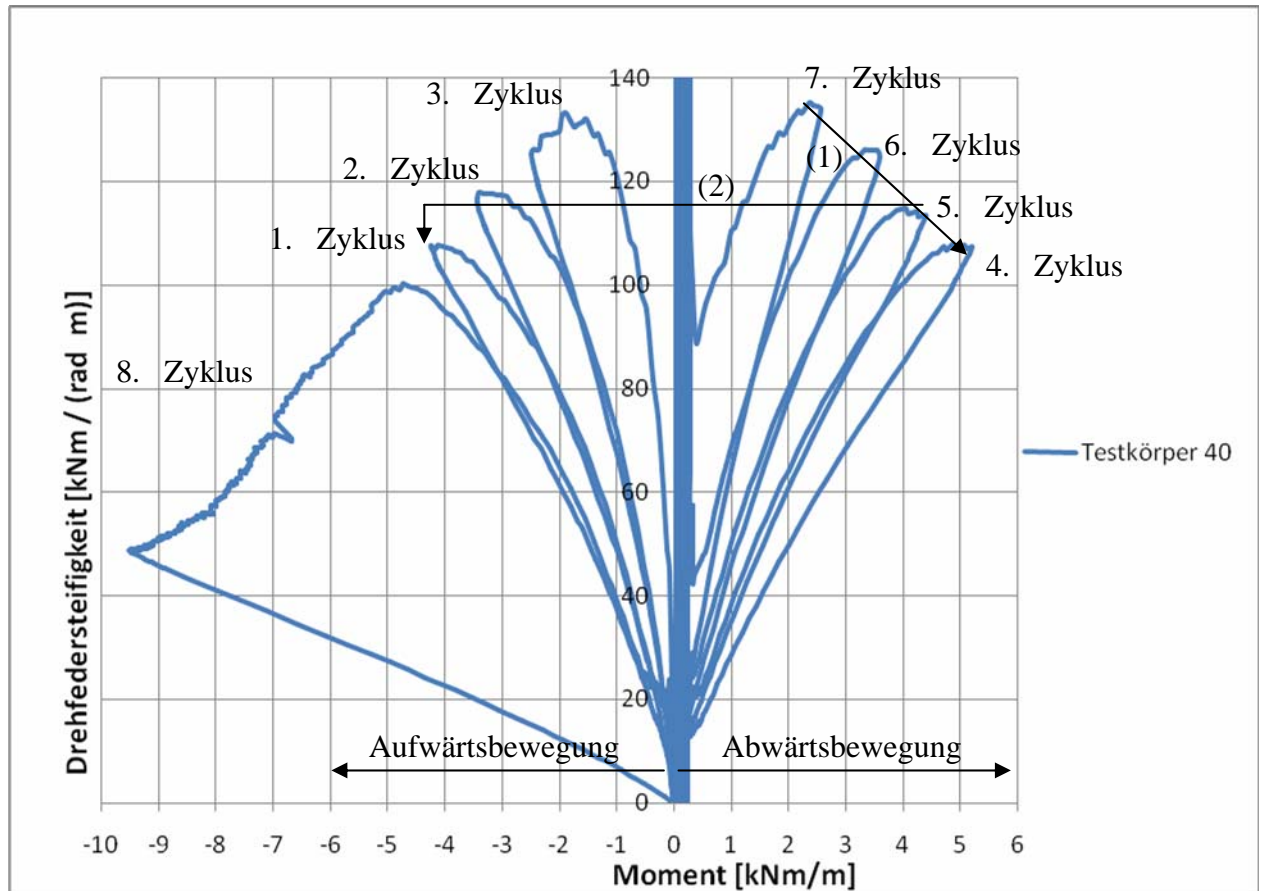


Diagramm 4.2 Federsteifigkeit-Momenten-Diagramm

Wie bereits oben erwähnt nimmt die Federsteifigkeit mit wiederholter und zunehmender Belastung ab. Im Diagramm wird dies an den abnehmenden Ordinatenwerten für die fortgeschritteneren Zyklen deutlich (1).

Die interessante Beobachtung, die hier zudem gemacht wird, ist dass bei gleicher Verformung das aufnehmbare Moment bei der die Verbindung öffnenden Bewegung (aufwärts) geringer ist als bei der die Verbindung schliessenden Bewegung (2). Dies ist zurückzuführen auf die auftretenden Umlenkkräfte, die die beiden Schichten tendenziell aufspalten. Bei schliessender Bewegung versteift sich die Verbindung hingegen.

Die Verbindungen wurden im letzten Zyklus (Zyklus 8, siehe Diagramm 4.1 und Diagramm 4.2) durch eine öffnende Momentenbelastung beansprucht. Diese Wahl wurde getroffen, da dies die schwächere Variante ist. Man kann den Diagrammen entnehmen, dass die Verbindungen stark duktil und aufgrund ihrer Versagsvorwarnungseigenschaft somit willkommen sind.

5 Ausblick

Im Anschluss an die bisherige Arbeit gilt es zwei Wege weiterzubeschreiten. Zum einen ist dies die Automatisierung der statischen Berechnungen. Hierin inbegriffen sind eine Schnittstelle, die die geometrische Aufbereitung der von der CAD-Software gelieferten Daten vereinfacht. Die verwendete Software ist einerseits in der Lage komplexe Strukturen zu berechnen, allerdings nicht ausgesprochen anwenderfreundlich. Zum anderen wird die Arbeit an den Verbindungen fort- und umgesetzt. Erkenntnisse aus der Simulierung helfen, deren Gestaltung zu vereinfachen und zu verbessern.